

**Л.В. ДЕРБУНОВИЧ**, д-р техн. наук, проф. каф АУТС НТУ"ХПИ",  
**М.А. БЕРЕЖНАЯ**, канд. техн. наук, доц. ХНУРЭ,  
**В.С. СУЗДАЛЬ**, д-р техн. наук,  
**Л.И. ГЕРАСИМЧУК**, канд. техн. наук,  
**Ю.М. ЕПИФАНОВ**, канд. техн. наук,  
**И.И. ТАВРОВСКИЙ**, м.н.с. (ИСМА НАН Украины)

## ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫРАЩИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ

У багатопроцесорній системі керування процесом вирощування монокристалів відмовостійкість забезпечена спільним використанням методів тестового і функціонального діагностування на базі спеціальних убудованих апаратно-програмних засобів діагностування і відновлення працездатності системи. Це дозволило підвищити її надійність і відмовостійкість, і, у цілому, ефективність керування і якість готової продукції.

In a multiprocessing control system of process growing monocrystals fault-tolerance was provided by sharing of methods of test and functional diagnosing and restoration of serviceability of system. It has allowed to raise its reliability and fault-tolerance and, as a whole, a management efficiency and quality of finished goods.

**Постановка проблемы.** В настоящее время в промышленном производстве крупногабаритных монокристаллов (МКР) широко используются установки типа "РОСТ" с цилиндрическим тиглем, на которых практически реализованы процессы управляемой кристаллизации из расплава на затравку с использованием для управления информации о положении уровня расплава в тигле [1]. Особенности процессов выращивания крупногабаритных МКР являются: многомерность, нестационарность и нелинейность этого объекта управления, высокий уровень производственных шумов и влияние субъективных факторов на качество и надежность функционирования. С другой стороны, такие особенности процессов выращивания МКР как существенная продолжительность и непрерывность рабочего цикла, высокий уровень производственных помех, большие материальные потери при появлении дефектов в работе ростовых установок определяют необходимость создания высоконадежных и отказоустойчивых многопроцессорных систем управления (МПСУ) процессом кристаллизации на основе встроенных средств диагностирования и восстановления работоспособности микропроцессорных средств этих систем [2]. Одним из эффективных путей достижения высоких показателей надежности МПСУ является введение аппаратной, программной и временной избыточности, обеспечивающей их отказоустойчивость (свойство системы сохранять работоспособность при наличии в ней неисправностей

заданного класса). Поэтому разработка МПСУ, в которых свойство отказоустойчивости обеспечивается ее внутренними ресурсами путем использования аппаратно-программных средств диагностирования технического состояния и восстановления работоспособности системы при наличии отказов, дефектов обусловленных типов и кратности при минимальных затратах на их реализацию является актуальной проблемой [3].

**Анализ литературы.** В [4] рассмотрены принципы организации систем тестового и функционального диагностирования с использованием охранных или диагностических процессоров, в [5] изложены методы и процедуры построения алгоритмов диагностирования для проверки исправности аппаратуры. Диагностическое обеспечение МПСУ состоит из средств тестового и функционального диагностирования, а также технических средств восстановления ее работоспособности [2]. Для реализации функционального диагностирования используются охранные или диагностические процессоры (ДП), примером которых является *CERBERUS-16* [7]. Структура такого ДП является упрощенной копией микропроцессора со своей системой команд, позволяющей отобразить управляющие программы резидентного МК, что усложняет процесс отладки всей системы и снижает эффект его практического использования. С другой стороны, известно, что в структуре современных МК имеются простейшие "watchdog" таймеры, исключающие зависание контроллеров в процессе функционирования с латентным периодом обнаружения ошибки, равным длительности управляющих программ. Использование в МПСУ "watchdog" таймера снижает реактивность системы управления, что при выращивании МКР приводит к экономическим потерям. Известны два основных подхода для реализации сигнатурного мониторинга в МПСУ, которые отличаются способом вычисления эталонных сигнатур. В первом подходе используются различные блоковые коды, обнаруживающие ошибки в потоках команд процессора и данных. На этапе компиляции управляющих программ для каждого сегмента вычисляются контрольные суммы, являющиеся эталонными сигнатурами сегментов. Во втором - контролируется правильность переходов и ветвлений программных сегментов с помощью блоковых кодов и времени выполнения программных сегментов [3]. Тестовое диагностирование исправности МПСУ осуществляется в режиме профилактического контроля и отладки, а также в режиме микродиагностики. Для этой цели широко используются встроенные на кристалл или печатную плату генераторы псевдослучайных, детерминированных тестовых последовательностей и синдромно-сигнатурные анализаторы для сжатия выходных реакций проверяемых устройств [10]. Использование режима микродиагностики особенно эффективно для медленно протекающих процессов, к которым относятся процессы кристаллизации при выращивании крупногабаритных МКР. В этом случае в процессе функционирования МПСУ в интервалах между формированием управляющих команд, можно осуществлять тестирование отдельных блоков системы.

**Цель статьи:** представление результатов разработки отказоустойчивой

МПСУ с встроенными средствами функционального и тестового диагностирования и оперативного восстановления работоспособности этой системы, на основе концепции сигнатурного мониторинга, что позволяет, в конечном итоге, снизить материальные потери производства МКР, повысить качество и конкурентоспособность готовой продукции.

**Анализ отказов.** Результаты анализа источников отказов сложных МПСУ показывают, что дефекты аппаратно-программного обеспечения систем составляют ~33% отказов, воздействие окружающей среды (электромагнитные помехи по цепям питания, ионизирующие излучения и др.) составляют 11% отказов системы, а влияние человеческого фактора для сложных распределенных систем управления составляет 50% всех отказов [6]. В процессе эксплуатации установки "РОСТ-5" на промышленном производстве ИСМА НАН Украины фиксировались отказы в распределенной системе управления процессом выращивания крупных щелочно-галоидных кристаллов (ЩГК), состоящей из пяти микроконтроллеров (МК), объединенных локальной сетью. Количественные соотношения между различными видами сбоев и отказами в различных модулях МПСУ характеризуются данными, приведенными в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношение сбоев и отказов в модулях МПСУ (%)

Тип модуля	Процессор	Память	Интерфейс	Система прерываний	По видам отказов
Вид отказа					
Одиночные сбои	60	56	68	55	59,8
Кратные сбои (пакеты)	32	37	15	33	29,2
Устойчивые отказы	8	7	17	12	11,0
По типам модулей	36,5	2,7	3,6	57,2	

Анализ данных табл. 1 показывает, что сбои и перемежающиеся неисправности составляют ~90% наиболее вероятных дефектов, которые являются причиной отказов МПСУ.

**Структура отказоустойчивой МПСУ выращиванием МКР.** В реальных условиях производства система управления выращиванием МКР представляет собой распределенную МПСУ. На рис. 1 приведена структурная схема объектного уровня МПСУ выращиванием крупногабаритных ЩГК на установке "РОСТ" [1].

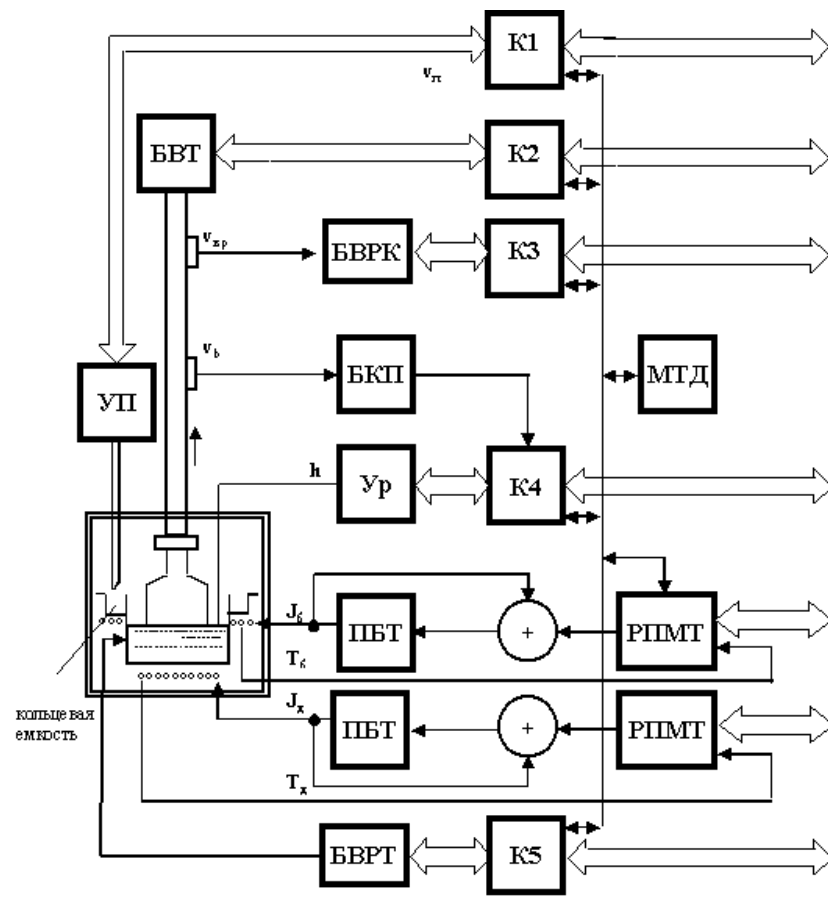


Рис. 1. Структурная схема МПСУ процессом выращивания ЩГК

МПСУ содержит на нижнем (объектном) уровне локальные контуры замкнутого и программно-логического управления (ПЛУ) параметрами установки, включающие в себя датчики, исполнительные устройства и контроллеры, а на верхнем - функциональные модули SCADA-системы. Установка оснащена уровнемером (Ур) для контроля уровня расплава в тигле, блоком вытягивания кристалла (БВТК), блоком вращения кристалла (БВРК) и тигля (БВРТ), устройством подпитки расплава (УП). Тепловой режим установки обеспечивается регуляторами температуры РПМТ и тиристорными преобразователями ПБТ. В табл. 2 показано назначение контроллеров объектного уровня СУ.

Таблица 2 – Функции контроллеров объектного уровня СУ

Контроллер	Назначение
K1	ПЛУ подпиткой расплава
K2	ПЛУ скоростью вытягивания МКР
K3	ПЛУ скоростью вращения МКР
K4	Управление диаметром растущего МКР
K5	ПЛУ скоростью вращения тигля
МТД	Модуль тестового диагностирования

При выращивании МКР в МПСУ осуществляется замкнутое управление тепловым режимом кристаллизации по одной выходной переменной (диаметру кристалла) и программно-логическое управление уровнем расплава, скоростью вращения тигля и кристалла, скоростью вытягивания кристалла. Функциональное диагностирование системы управления построено на основе сигнатурного мониторинга управляющих программ контроллеров  $K1 \div K5$  с помощью диагностического процессора (ДП) [9]. Проверка правильности функционирования системы в отдельных режимах и на отдельных участках выполнения управляющих программ охраняемыми или ДП является по существу развитием метода наблюдателей Люенбергера, где под системами наблюдения за правильностью функционирования понимают линейные участки управляющих программ. Алгебраические инварианты на этих участках – это контрольные суммы микрокоманд или время выполнения сегментов программы. Основной проблемой при использовании ДП является выбор алгебраических инвариантов, позволяющих сократить латентный период обнаружения ошибки и сократить затраты на реализацию диагностического обеспечения. В начале линейного участка программы ДП принимает, например, эталонную контрольную сумму и осуществляет свертку микрокоманд этого линейного участка с помощью сигнатурных или синдромных анализаторов, а в конце линейного участка ДП полученную сигнатуру сравнивает с эталонной. Такой сигнатурный мониторинг выполняется для всех линейных участков управляющей программы, а размерность этих участков определяет латентный период обнаружения ошибок. Другими алгебраическими инвариантами, которые широко используются в практике сигнатурного мониторинга, являются: время выполнения линейных участков управляющих программ и коды сегментов [8]. Для формирования эталонных сигнатур множество управляющих программ разбивается на программные сегменты, для которых вычисляется минимальное и максимальное время. Для определения времени выполнения некоторого сегмента программы используют его графовые модели, в которых вершины соответствуют множеству команд, а дуги – последовательности их выполнения. Каждая дуга отмечена временем выполнения команд – вершиной, из которой она исходит.

При разбиении программы на сегменты необходимо соблюдать следующие условия, определяющие ее контролепригодность:

- присутствие в программном сегменте команд с фиксированным временем выполнения;
- отсутствие в сегменте программы циклов с неопределенным количеством вхождений в него.

Если выполнены эти условия, то для любого программного сегмента в результате анализа его временного графа можно найти множество всех путей от начальной до конечной вершины сегмента. Это множество позволяет определить минимальное и максимальное время выполнения каждого сегмента программы как  $T_{\min}$  и  $T_{\min} + \Delta T$ , соответственно. Контроль правильности выполнения программы по времени ее выполнения позволяет обнаружить закликивание программ. Этот контроль осуществляется во время функционирования МК без изменения его структуры. Однако контроль по времени является недостаточным для определения правильности выполнения программы. При появлении сбоя МК может совершить ошибочный переход к другому сегменту. Такую ошибку можно обнаружить, если одновременно с контролем временных сигнатур контролировать правильность выполняемых переходов от сегмента к сегменту [8]. Для осуществления такого контроля необходимо построить для контролируемой программы граф переходов.

Для построения графа переходов программу разбивают на сегменты следующим образом. Пусть адрес команды состоит из  $k$  разрядов, которые представляют в виде двух частей: изменяемой, содержащей  $i$  разрядов, и неизменяемой, содержащей  $(k - i)$  разрядов, называемых меткой сегмента. В сегмент включаются команды с одинаковыми метками, и коды этих меток проверяются на каждом шаге выполнения микрокоманд. При необходимости увеличения или уменьшения длины сегмента достаточно уменьшить или увеличить длину метки. Например, при 16-разрядном адресе команды и 8-разрядной метке сегмент содержит 256 команд, при 9-разрядной метке – 512 и при 7-разрядной метке – 128. Пример построения графа переходов приведен на рис. 2, где 22, 26-29, 31 – метки сегментов. В данном случае переход от сегмента 26 к сегменту 22 является разрешенным, а от 26 к 28 – запрещенным. Вершинами графа являются метки сегментов, а дугами – переходы между сегментами. Переходы внутри сегмента кодируются петлей, разрешенными являются переходы только между смежными вершинами графа.

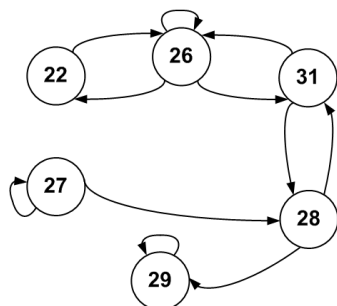


Рис. 2. Граф переходов сегмента программы

Структурная схема ДП, осуществляющего контроль правильности выполнения управляющих программ МК путем анализа время выполнения линейных участков управляющих программ, представлена на рис. 3.

В начале выполнения определенного сегмента управляющей программы МК блок управления загружает из ПЗУ эталонные значения инвариантов этого сегмента в регистры контрольной метки (РКМ), эталонной сигнатуры (РЭС) и таймеров-счетчиков  $T = T_{\min}$  и  $\Delta T$ . Выполнение сегмента управляющей программы сопровождается: проверкой текущей метки обрабатываемого сегмента путем сравнения содержимого регистра текущей метки (РТМ) с содержимым (РКМ); измерением времени выполнения программного сегмента счетчиками времени СчТ и СчΔТ и вычислением текущей сигнатуры потока управляющих команд блоком сигнатурного анализатора (СА). В СчТ записывается минимальное время  $T_{\min}$  выполнения сегмента программы, а в СчΔТ записывается разность  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ . Проверка эталонных сигнатур и времен выполнения сегмента программы осуществляется по команде блока управления (БУ) при изменении номера сегмента программы.

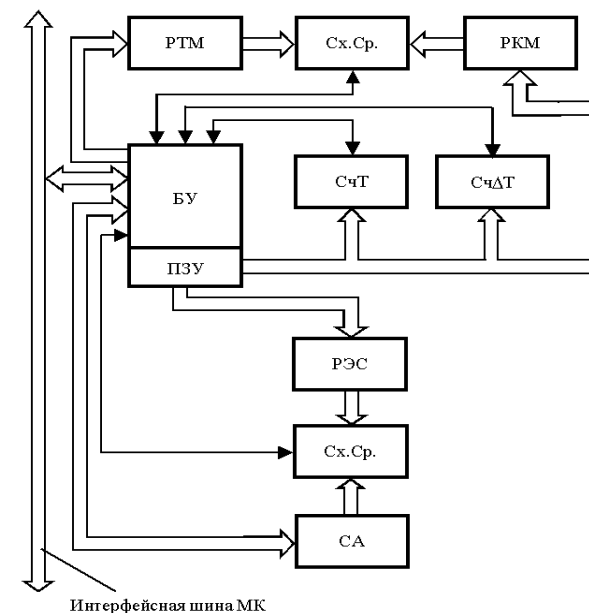


Рис. 3. Структура ДП: РТМ, РКМ – регистры текущей и контрольной метки; Сх.Ср. – схема сравнения; СчТ – счетчик времени  $T(\Delta T)$ ; РЭС – регистр эталонных сигнатур; СА – сигнатурный анализатор; БУ – блок управления

Использование ДП позволило осуществить сигнатурный мониторинг правильности выполнения управляющей программы контроллеров объектного уровня и обнаружить сегмент программы, выполненный с ошибкой. При наличии временной избыточности ДП возвращает основной процессор к выполнению программы в определенную контрольную точку. Сочетание ДП и метода повторной "прокрутки" сегментов программы повысило отказоустойчивость МПСУ для класса перемежающихся неисправностей и сбоев МК. Восстановление правильного функционирования МК этим методом осуществляется при выполнении следующих условий:

- время выполнения полного цикла управляющей программы контроллера значительно меньше максимально допустимого, определяемого временными параметрами управляемого ТП;
- латентный период обнаружения ошибки меньше цикла управляющей программы МК;
- аппаратная и временная избыточность, обеспечивающая отказоустойчивость МК, должна быть минимальной.

Тестовое диагностирование МПСУ в режимах профилактических проверок и микродиагностики осуществляется диагностическим модулем

Проектирование технического обеспечения МПСУ процессом выращивания МКР, в том числе схем ДП и ССА, осуществляется либо на основе специализированных схем *ASIC*, либо на основе ПЛИС (типа *FPGA*). Для реализации логических структур МПСУ выращивания крупногабаритных МКР, обеспечивающей длительную работу и безотказность функционирования контроллеров управления всем комплексом оборудования технологического процесса, использованы ПЛИС, преимущества которых основаны на следующих факторах. Архитектура ПЛИС, содержащая набор стандартных технических средств, позволяет легко встраивать в контроллеры МПСУ логические элементы, сумматоры, триггеры, мультиплексоры и т.д. при использовании описания на языке *Verilog* (или *VHDL*), что является основой для построения высокоэффективной функционально законченной системы, в том числе и устройства для диагностирования этих контроллеров, а встроенные средства самотестирования чипа, поддерживающие стандарт *IEEE 1149.1-1990 "Standard Test Access Port and Boundary Scan Architecture" (JTAG)* позволяют существенно упростить организацию тестового диагностирования. В каждом контроллере микропроцессор и схемы ПЛИС объединены в единую JTAG-цепочку, что позволило легко организовать тестирование межс-

**Выводы.** Представлена структура отказоустойчивой МПСУ для выращивания крупногабаритных МКР на установках типа "РОСТ". Отказоустойчивость МПСУ и высокий коэффициент готовности обеспечивается использованием функционального и тестового диагностирования контроллеров системы. Функциональное диагностирование осуществляется диагностическими процессорами, которые осуществляют сигнатурный мониторинг правильности выполнения управляющей программы контроллеров объектного уровня, что позволяет восстановить работоспособность системы при появлении наиболее вероятных дефектов перемежающегося типа. Объединение тестового и функционального диагностирования с использованием специальных встроенных средств диагностирования и восстановления работоспособности позволяет повысить надежность и отказоустойчивость МПСУ процессом выращивания МКР в целом.

Поступила в редколлегию 19.11.2007